

文章编号: 1000-0550(2006) 01-0148-05

单砂体高部位油水倒置分布的成因机制

张小莉^{1,2} 查明¹ 王鹏²

(1 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院 山东东营 257061)

(2 西北大学大陆动力学教育部重点实验室 西北大学地质学系 西安 710069)

摘要 成藏地质条件的复杂多变控制了油水分布的复杂性和多样性,尤其是在低渗透油藏中。断层圈闭油藏和岩性油藏中存在一种类似的油水倒置分布样式,即由单砂体高部位向低部位,依次为水层、含油水层、油水同层、油层、油水同层、含油水层、水层。通过分析两种油藏类型中低渗透砂体储层高部位油水倒置的控制因素,探讨了油水倒置的两种成因机制。分析结果表明,断层圈闭为主的油藏中,造成油水倒置的主要原因是断层封闭性的历史性差异,其次是储集层物性和渗透率级差;而上倾尖灭砂体岩性油藏中,造成油水倒置的主要因素是储集层物性及其变化,尤其是储层层内非均质性。同时,分析结果进一步表明,油水倒置系统中,存在低电阻率油层。

关键字 低渗透油藏 油水分布 岩性油藏 成因机制 储层非均质性

第一作者简介 张小莉 女 1968 年出生 在读博士 石油地质学

中图分类号 TE122.3

文献标识码 A

油气成藏条件尤其是储层地质条件的差异性决定了油、水富集的多变性,尤其是在低渗透油藏中,储层、烃源岩的非均质性和盖层、圈闭的相对性使得油水分布更为复杂。低渗透油藏单砂体储层中,除具有常规高部位含油、低部位含水的油水分布规律外,还存在砂体高部位含水、较高部位含油、低部位含水的油水倒置分布。鄂尔多斯盆地中生界延长组、延安组岩性油藏^[1]、渤海湾盆地济阳拗陷东营凹陷古近系油藏^[2]、松辽盆地白垩系岩性油藏或断层圈闭油藏,以及南襄盆地泌阳凹陷第三系核桃园组的断层圈闭油藏^[3]等,均发现了后一类型的油水分布样式。具有油水倒置分布的油藏,其储层一般具有低渗透的特点。由于单砂体中存在油水倒置分布样式,因此一个油藏中,如果钻遇砂体高部位的含油性较差或不含油,并不一定意味砂体较高部位的含油性差。

1 油水倒置分布油藏的特点和类型

所谓油藏中单砂体高部位油水倒置,是相对于常规油藏中上油下水特征而言的。单个砂体中,由构造高部位向低部位,储层流体性质依次为水层、含油水层、油水同层、油层、油水同层、含油水层、水层,油水分布呈现出水—油—水的规律性变化,高部位油水倒置分布。

目前所发现的具有上述油水倒置分布规律的油藏类型主要有两种。一种是以断层圈闭为主的复杂多断块油藏,主要分布在中国东部断层发育的断陷盆地中,其油水分布特征如图 1 所示。为便于表达,图中含油水层和水层统一用水层来表示。

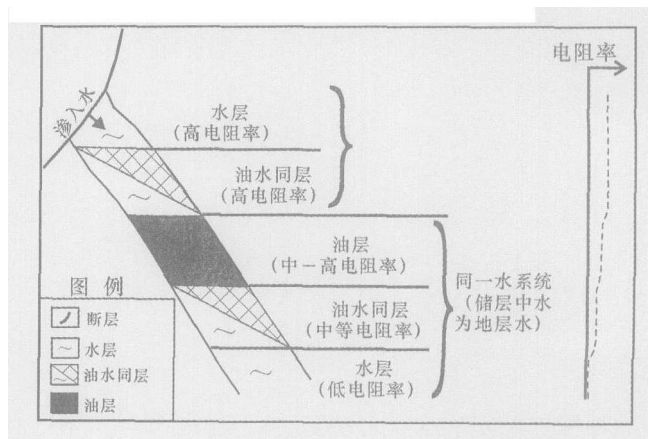


图 1 单砂体高部位油水分布示意图(断层圈闭)

Fig 1 Sketch diagram showing the oil/water distribution in the high portions of the single sandstone body (fault trap)

另一类具有油水倒置分布的油藏类型为岩性油藏。在鄂尔多斯盆地、松辽盆地、渤海湾盆地等陆相断陷湖盆斜坡带上倾尖灭砂体中,具有与上述类似的油水分布(图 2)。

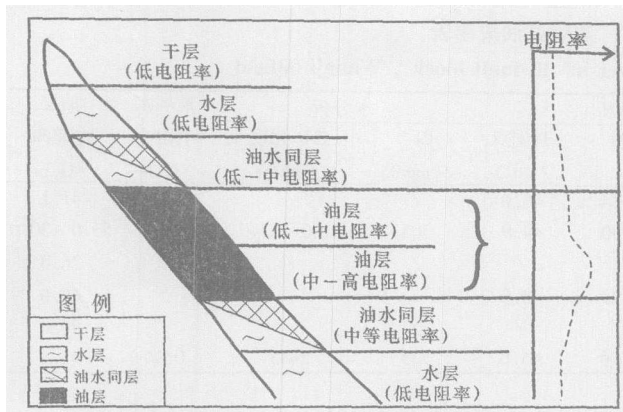


图 2 上倾尖灭砂体中油水分布示意图 (岩性油藏)

Fig 2 Sketch diagram showing the oil/water distribution in upward wedge out sandstone body (lithologic oil reservoirs)

2 油水倒置分布油藏成因机制

众所周知, 控制油水分布的主要因素是重力、毛细管力、水动力等。重力和毛细管力是始终起作用的因素, 水动力影响的程度则取决于地下水流的速度的方向。复杂多断块油藏中或岩性油藏中, 控制油水分布的因素如构造和储层特征的多样性和复杂性决定了油水分布的复杂性和多样性。其中, 断层封闭性的差异往往造成油水分布特征不同; 同时, 低孔、低渗和非均质严重的储层阻碍油气运移和聚集, 使油气运移和富集变得更为非均质, 油气倾向于富集在相对高构造部位和相对高孔高渗的储层中。

油气成藏过程是油驱替水的过程, 也就是油气进入原来饱和水的水润湿相储层中。成藏过程中, 油如果进入储层中富集成藏, 就必须克服各种阻力, 所以成藏动力和成藏阻力之间的关系, 决定了油是否能够驱替储层中的水而聚集成藏。同时, 油气聚集程度与油源的充足程度也有关系。下面假设油源供给充足的条件下, 分析油水倒置的成因机制。

2.1 断层圈闭油藏中油水倒置的成因机制

复杂断块油藏中, 断层对油气分布起到了重要控制作用。油气富集主要取决于断层封闭性, 而断层封闭作用往往是相对的, 断层的不同部位, 不同发育时期, 其封闭性可能有所不同^[4]。南襄盆地泌阳凹陷王集地区 断块断裂多期发育, 主力含油层系为第三系核桃园组核三段, 核三段进一步可分为 ~ 油组。其中 H3 6¹⁺² 砂体, 上倾方向为断层圈闭、侧向上岩性遮挡形成油藏; 成藏之后, 断层附近 W 34 井区封闭性曾经变差, 随后又具有一定封闭性; 断层封闭

性曾经变差的 W 34 井区附近砂体中含水, 水矿化度较低 (2 100~2 540 mg/l); 该砂体远离断层的下倾方向, 储层流体依次为油水同层、油层、油水同层、含水层、水层; 距断层较远处的砂体低部位水矿化度 (3 443 mg/l) 明显高于 W 34 井区断层附近该砂体高部位水矿化度, 反映同一砂体中具有两种不同的水系统 (图 3 表 1)。

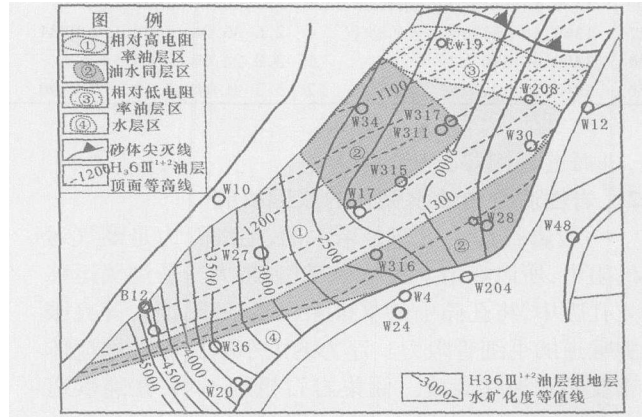


图 3 王集油田 H3 6¹⁺² 油组矿化度及油层分布特征

Fig 3 Formation water salinity distributive characteristics of H3 6¹⁺² oil layer

断层附近砂体高部位水层、油水同层的高度反映了断层封闭的相对性及其与储集层渗透率级差之间的相对关系。如果断层封闭性变差, 渗透率级差较小, 且储层以高渗透率为其特征, 则不利于油气保存, 水层厚度较大, 有时甚至单砂体中油气完全散失^[5]; 而如果断层封闭性在短时期内暂时变差, 且渗透率级差较大, 砂体高部位储集层物性较差, 在断层封闭性变差的时期, 渗入水 (或其他层系地层水) 作用范围较小, 砂体较高部位有油气富集。因此, 储集层渗透率级差变化和断层封闭性的历史性差异决定了单砂体高部位含水程度。在复杂断层化背景下发育的低渗透储层, 油水分布更为复杂。

断层圈闭油藏中单砂体高部位地层水和低部位水的性质往往不同。一般高部位水为渗入水或其他层系地层水注入砂体中形成, 水性质不同于该砂体低部位中的地层水, 高部位水矿化度低值, 水层电阻率高, 有时甚至高于其下部油层电阻率 (见图 1, 表 1)。由于油、水层电阻率对比关系变化, 常常造成常规测井解释中, 把砂体高部位高电阻率水层错误地解释为油层, 其下部相对低电阻率油层错误地解释为水层, 造成油层遗漏。解决该问题的有效途径是进行精细地质分析, 寻找与油层对应的水层特征和地层水参

表 1 王集油田 断块 H3 6¹⁺²油组试油成果表
Table 1 The results of test oil of H3 6¹⁺² oil layer in fault block, Wangji oilfield

井号	井段 /m	岩性	层数	厚度 /m	日产量			油分析		水分析		地层水电阻率 /Ω·m	油层电阻率 /Ω·m
					油 /t	水 /m ³	密度 / (mg/cm ³)	粘度 /70pa·s	凝固点 / (°C)	Cl ⁻ / (mg/l)	总矿化度 / (mg/l)		
EW 19	1192 6~1194 6	砾状砂岩	1	1.9	2.08	0.00	0.8698	20.84	43.0	/	/	/	41.1
W 34	1242 3~1246 0	细砂岩	2	3.7	1.26	19.10	0.8760	26.00	44.9	305	2100~2540	1.35	53.0~30.0
W 311	1330 8~1334 0	细砂岩	1	3.2	5.00	3.00	/	/	/	/	/	/	26.0
W 27	1368 4~1371 0	含砾砂岩	1	2.6	36.00	8.00	0.8734	20.23	44.0	/	/	/	60.0
W 30	1399 4~1403 2		1	3.8	24.00	0.00	/	/	/	/	/	/	70.0
W 36	1467 2~1473 4	细砂岩	2	5.2	0.04	3.10	0.8890	54.70	45.0	735	3443	0.90	45.8

数, 进而进行测井分析与解释。

2.2 岩性油藏中油水倒置的成因机制

一般岩石初始状态是亲水的, 毛细管力是油气运移的阻力, 所以喉道半径越小, 阻力越大。若油气运移进入孔隙中, 将孔隙中的水排除, 必须依靠浮力等克服孔隙喉道的毛细管阻力。浮力的大小取决于油层流体的密度差和油柱高度。储集岩石粗细不均, 孔隙喉道大小不一, 小喉道中进入石油的概率显然低于大喉道。在相同压力条件下, 细喉道的储集岩石具有较低的含油饱和度, 粗喉道的储集岩具有较高的含油饱和度。由此可见, 储层渗透率级差与成藏动力条件决定了油驱水效率和油气充满足度^[6-9], 进一步可反映成藏动力条件与储集层非均质性之间相互作用的效果。

单砂体上倾尖灭方向上, 由于沉积微相或沉积动力条件变化, 或由于成岩作用的差异性, 储层孔隙结构较为复杂, 渗透率变低, 毛细管阻力增大, 导致油驱水阻力增大, 油驱水效率降低。相同成藏动力条件下, 储集层孔隙结构复杂程度越高, 渗透率级差越大, 高部位含水和油水同层的范围越宽, 反之就越窄。低、特低渗透砂体中, 油水界面之上储层含油饱和度受油柱高度和毛细管力的双重控制, 甚至毛细管力的控制更为明显。低或特低渗透率储层高部位含水饱和度大于其下部相对高渗有效储层段, 油在相对高部位中聚集。由此可见, 上倾尖灭砂体岩性油藏中, 影响低渗透储层流体分布的主要因素是储层物性。图 4 为惠民凹陷基山砂体中 4 号砂组一单个上倾尖灭砂体中油水分布示意图。钻遇该砂体的 4 口井中, 砂体的各项参数和含油性如表 2 所示。各项参数反映, 砂体的上倾方向, 岩石的孔隙结构复杂, 储层非均质性增强。同时, 高 544 井和商 548 井核磁共振测井反映 (图 5), 商 544 井中 4 号砂组中储层微孔隙发育, 同时具有一定的大孔隙; 而商 548 井中的 4 号砂体储层相对以大孔隙为主。图 5 中两口井核磁共振测井

资料反映了两种孔隙结构类型。从表 2 图 5 中可以看出, 该砂体中油水分布受砂体物性及其非均质性控制, 在砂体高、低部位含水, 较高部位含油, 油水关系倒置。

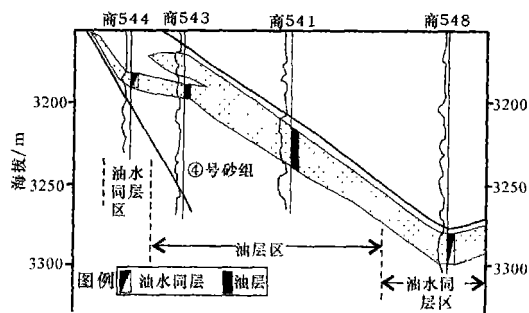


图 4 基山砂体中一上倾尖灭砂体的油藏剖面示意图
Fig 4 Sketch section showing reservoirs in the upward wedge out sandstone body in Jishan sand body

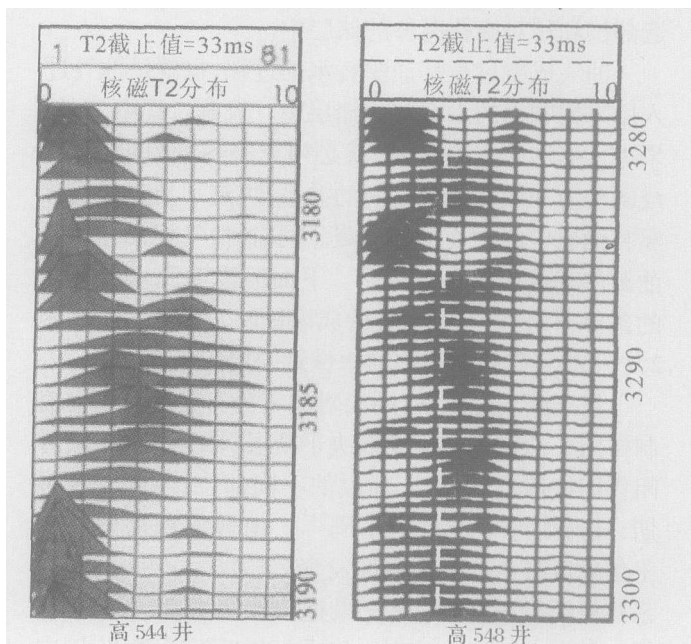


图 5 孔隙结构特征 (核磁共振 T₂ 谱分布)
Fig 5 The characteristics of pore structure (T₂ distribution of NMR)

表 2 基山砂体储层各项参数
Table 2 The parameters of one reservoir in Jishan sand body

项目	商 544	商 543	商 541	商 548
井段 /m	3182.4~3187.0	3198.3~3200.3	3207.2~3218.2	3280.5~3297.0
有效厚度 /m	5.6	2.0	11.0	16.5
岩性	含粉砂细砂岩	含粉砂细砂岩	含粉砂细砂岩	含粉砂细砂岩
泥质含量 /%	30.2	28.7	26.3	17.0
孔隙度 /%	16.5	15.7	15.4	16.0
渗透率 / $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	2.7	2.23	2.46	4.0
电阻率 / $\Omega \cdot \text{m}$	7.5	8.1	9.4	8.5~9.0
含油饱和度 /%	48.0	60.1	41.0	
测井解释结论	油水同层	油层	油层	油水同层
试油产量 吨(油/水)	压裂后: 7.35/3.90	未试	两次: 1.83/0.00 3.20/0.00	6.15/12.68
试油结论	油水同层	/	油层	油水同层
综合含水率 /%	34.7	/	0.0	70.0
地层水矿化度 /PPm	28053	/	/	29907
水型	CaCl ₂	/	/	CaCl ₂
润湿性	/	亲水 /3206.87m	亲水	亲水
分布区域	相对低电阻率油水同层	相对低电阻率油层	相对高电阻率油层	相对高电阻率油水同层

一般在高压或较强的成藏动力条件下, 上倾尖灭砂体中, 高部位水层和油水同层范围较窄或不存在; 而在较弱的成藏动力条件下, 砂体上倾尖灭方向储层的非均质性增强, 油气成藏阻力增大, 在阻力大于成藏动力的条件下, 油气很难驱替砂体高部位孔隙中的水, 在单砂体中呈现上水下油的特征。

3 低电阻率油层

油水倒置分布的岩性油藏中, 往往存在低电阻率油层^[10]。低电阻率油层形成的主要原因是储层孔隙结构复杂, 束缚水饱和度高, 含油饱和度相对低; 同时, 砂体尖灭方向上, 泥质含量增高, 粘土矿物附加导电性也在一定程度上致使油层电阻率进一步降低^[3]。

综合分析上述两类油藏中低电阻率油层的特征可知, 低电阻率油层是在一定的构造背景下, 由于岩性变化、地层水等而形成的。

4 结论

通过上述分析认为:

(1) 断层圈闭油藏中油水倒置的成因机制为断层封闭性的历史性差异与储集层渗透性和渗透率级差, 且以断层封闭性为主导因素。

(2) 砂体上倾尖灭岩性油藏中油水倒置的主要原因为储集层物性差异和渗透率级差。上倾尖灭方向, 储层非均质性增强, 物性整体变差, 油气聚集阻力

增大, 含油饱和度降低。

(3) 低渗透砂体中油水倒置系统中往往存在相对低电阻率油层。其中断层圈闭为主的油藏中, 相对低电阻率油层的表现主要是由于油、水层电阻率对比关系发生变化而导致的; 而砂体上倾尖灭岩性油藏的油水倒置分布系统中, 低电阻率油层是由于储层孔隙结构复杂, 束缚水饱和度较高, 含油饱和度相对低和黏土矿物的附加导电性等因素而导致的。

参考文献 (References)

- 苏震萍, 彭惠群, 汪作阳. 鄂尔多斯盆地的试油地质及中生界储层试油地质措施基本模式. 低渗透油气田, 1999, 4(1): 23~27 [Su Zhenping, Peng Huiqun, Wang Zuoyang. Geology of oil production test in Ordos basin and its basic mode of measures for Mesozoic reservoirs. Low Permeability Reservoirs, 1999, 4(1): 23~27]
- 毛振强, 刘文建. 低渗透油藏流体分布控制因素分析——以东营凹陷大芦湖油田为例. 胜利油田职工大学学报, 2004, 18(1): 31~33 [Mao Zhenqiang, Liu Jianwen. Control factors of fluid distribution in low permeable reservoirs: an example from Dahu oilfield in Dongying sag. Journal of Shengli Oilfield Staff University, 2004, 18(1): 31~33]
- 张小莉, 王恺. 王集油田相对低电阻率油层成因及识别. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 60~62 [Zhang Xiaoli, Wang Kai. Origin and identification of low resistivity oil layers in Wangji oilfield. Biyang sag. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5): 60~62]
- 吕延防. 断层封闭的差异性分析. 大庆石油学院学报, 1996, 20(4): 7~11 [Lü Yanfang. Analysis on the difference of fault seals. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1996, 20(4): 7~11]
- 陈建文, 厉玉乐, 孙德君, 闫同生. 油田水动力系统与油气藏的形

- 成. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(4): 31~38 [Chen Jianwen, Li Yule, Sun Dejun, Yan Tongsheng. The relationship between hydrodynamic system of oilfield waters and hydrocarbon generation. Marine Geology & Quaternary Geology, 1999, 19(4): 31~38]
- 6 邱楠生, 万晓龙, 金之钧, 等. 渗透率级差对透镜状砂体成藏的控制模式. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 48~52 [Qiu Nansheng, Wan Xiaolong, Jin Zhijun, et al. Controlling model of permeability difference on the hydrocarbon accumulation of sand lens reservoirs. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 48~52]
- 7 张荻楠, 刘淑琴. 特低渗透油层储层非均质性对油水分布的影响. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(5): 7~12 [Zhang Dinan, Liu Shuqin. Effect of heterogeneity in ultra low permeable reservoirs on oil/gas distribution. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2000, 19(5): 7~12]
- 8 Marco A. Moraes S. and Ronald C. Surdam. Diagenetic heterogeneity and reservoir quality: fluvial, deltaic, and turbiditic sandstone reservoirs, Potiguar and Roncavo rift basin, Brazil. AAPG Bulletin, 1993, 77(7): 1142~1158
- 9 章成广, 秦瑞宝. 用毛管压力曲线解释原始含水饱和度. 江汉石油学院学报, 1999, 21(4): 8~10 [Zhang Chengguang, Qin Ruibao. Calculating original water saturation by capillary curves. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1999, 21(4): 8~10]
- 10 曾大乾, 李淑贞. 中国低渗透砂岩储层类型及地质特征. 石油学报, 1994, 15(1): 38~46 [Zeng Daqian, Li Shuzhen. Types and characteristics of low permeability sandstone reservoirs in China. Acta Petrolei Sinica, 1994, 15(1): 38~46]

Oil/water Inversion and Its Genetic Mechanism in the Higher Portions of the Single Sandstone Body

ZHANG Xiaoli^{1,2} ZHANG Ming¹ WANG Peng²

(¹ China University of Petroleum (East China), Dongying Shandong 237061;

² Key Laboratory for Continental Dynamics of the Ministry of Education, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069)

Abstract Complex and levity of geological conditions for forming oil reservoirs result in the complex and levity of oil/water distribution, especially, in low permeability reservoirs. There have one kind of oil/water inversion in fault trap and lithologic oil reservoirs, that is, from the high portions of the single sandstone body to the low portions, they are water layer, water-bearing layer, oil-water layer, oil layer, oil-water layer, water-bearing layer, and water layer. According to analysis on the controlling factors of the oil/water inverted distribution in low permeability reservoirs, two kinds of genesis mechanisms were discussed. The results indicate that there have two status. First, in fault trap, the history diversity of the fault sealing is the key reason for the oil/water inverted distribution and physical properties of reservoir and permeability difference are the second reason. Second, in upward wedge out sandstone, physical properties of reservoir and its levity, especially, the heterogeneity of layer, are the key reasons for the oil/water inverted distribution. Meanwhile, The results indicate that they include the low-resistivity pay zone in the oil/water inversion system.

Key words low permeability reservoirs, oil/water distribution, lithologic oil reservoirs, genetic mechanism, heterogeneity of reservoir